

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Porovnání mechanických vlastností vysokopevnostního materiálu TWIP 800

Comparison of mechanical properties of high-strength material TWIP 800

Lukáš Horák
KSP – TP – B44

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph. D. - *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 47

Počet obrázků: 27

Počet tabulek: 13

Počet příloh: 19

Datum: 23.května.2008

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program:	B2343 – Strojírenství
Student:	Lukáš Horák
Téma práce:	Porovnání mechanických vlastností vysokopevnostního materiálu TWIP 800 Comparison of mechanical properties of high-strength material TWIP 800
Číslo BP:	KSP – TP – B44
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Doubek, Ph. D. - <i>TU v Liberci</i>
Konzultant BP:	Ing. Jiří Sobotka – <i>TU v Liberci</i>

Abstrakt:

Obsah bakalářské práce je zaměřen na zjišťování základních mechanických vlastností nově používaného materiálu s názvem TWIP. Zkoumané vlastnosti jako průběhy tahových napětí, meze pevností, tažnost, součinitel normálové a plošné anizotropie byly vypočteny z výsledků tahových zkoušek. Zkoušky proběhly v laboratořích TUL, jako vzorky jsme použili plechové přístřihy, vše dle platných norem. Všechna měření, výpočty i výsledky jsou popsány v bakalářské práci, včetně

teoretické problematiky. Přínos Bakalářské práce by měl být v budoucím zkoumáním a zpracování materiálu TWIP.

Klíčová slova:

- TWIP (Twinning Induced Plasticity)
- Dvojčatění
- Tahový diagram
- Mechanické vlastnosti
- Anizotropie

Abstract:

This bachelor work deals with the determination of basic mechanical properties for newly developed material marked like TWIP (Twinning Induced Plasticity). Measured properties like running of tensile stresses, ultimate strength, ductility and normal and plane coefficient of anisotropy were calculated from results of static tensile test. Tests were carried out in labs of TUL, like samples were used sheet blanks – all according the valid standards. In bachelor work are described all measurements, calculations and results - including theory. The benefit of this work is the necessary first step to measure and describe basic behavior of TWIP material.

Key words:

- TWIP(Twinning Induced Plasticity)
- [Twinning](#)
- Tension diagram
- [Mechanical properties](#)
- Anisotropy

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 23. května 2008

.....

Lukáš Horák

Tutleky 33

517 41 Kostelec nad Orlicí

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Pavlu Doubkovi Ph. D. , který byl původcem tohoto velice zajímavého tématu.

Dále velký dík patří mému konzultantu panu Ing. Jiřímu Sobotkovi za jeho profesionální přístup, rady v části teoretické i experimentální a za pomoc při doplňování odborných znalostí.

V neposlední řadě patří poděkování mým rodičům, kteří umožnili a podpořili mé studium na Technické univerzitě v Liberci.

Lukáš Horák

OBSAH

Seznam zkratk a symbolů:	9
1. Úvod	11
2. Mechanismy plastické deformace.....	12
2.1. Elastická deformace	12
2.2. Plastická deformace.....	13
3. Plastická deformace skluzem	13
4. Plastická deformace dvojčatěním.....	15
4.1. Kritické napětí při dvojčatění.....	16
4.2. Srovnání deformace skluzem a dvojčatěním	17
5. Sortiment plechů používaných v automobilovém průmyslu	17
5.1. Hlubokotažné plechy z ocelí ukladných hliníkem	17
5.2. Plechy z IF ocelí.....	18
5.3. Oceli s BH efektem	18
5.3.1. Oceli se zvýšeným obsahem uhlíku.....	19
5.3.2. Oceli se zvýšeným obsahem titanu resp. niobu.....	19
5.4. Vysokopevnostní materiály	20
5.4.1. DP oceli (Dual Phase)	20
5.4.2. TRIP oceli (Transformation Induced Plasticity)	20
5.4.3. CP oceli (Complex Phase).....	21
5.4.4. Martenzitické oceli.....	21
5.5. TWIP oceli (Twinning Induced Plasticity)	22
6. Statická zkouška tahem	23
6.1. Vyhodnocení zkoušky	24
7. Anizotropie.....	26
7.1. Normálová anizotropie	27
7.2. Plošná anizotropie	28
8. Statická zkouška tahem.....	29
8.1. Hodnoty mechanických vlastností	30
8.2. Průběhy napětí u zkoušených vzorků	33



8.3. Porovnání výsledků mechanických vlastností v závislosti na směru odebraného vzorku.....	37
9. Koeficient anizotropie	40
10. Závěr	42
11. Použitá literatura	44
12. Seznam příloh na CD:.....	45

Seznam zkratk a symbolů:

ZKRATKA NEBO SYMBOL	JEDNOTKY	VÝZNAM
BCC	[-]	body - centered - cubic
BH	[-]	bake hardened steel
CP	[-]	complex phase
CQ	[-]	comercial quality (plechy běžné kvality)
DP	[-]	dual phase
DQ	[-]	drawing quality (tažné plechy)
DDQ	[-]	deep drawing quality (klubokotažné plechy)
EDDQ	[-]	extra deep drawing quality (zvlášť hlubokotažné plechy)
EDDQ - S	[-]	extra deep drawing qualita - super (super hlubokotažné plechy)
FCC	[-]	face - centered - cubic
HCP	[-]	hexagonal - close - packed
IF	[-]	interstitials free steels
TRIP	[-]	transformation induced plasticity
TWIP	[-]	twiping indukted plasticity
A	[%]	tažnost
A ₀	[mm ²]	plocha průřezu materiálu
A _{SR}	[mm ²]	plocha skluzové roviny
A _x	[%]	tažnost ve směru
b	[mm]	šířka vzorku
b ₀	[mm]	počáteční šířka vzorku
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	osová síla
Fe	[N]	síla odpovídající výrazné mezi kluzu
F _{p0,2}	[N]	síla odpovídající trvalé absolutní deformaci 0,2%
F _R	[N]	síla působící na jednotku skluzové roviny
G	[MPa]	modul pružnosti ve smyku
k	[-]	koeficient
L	[mm]	konečná délka
L ₀	[mm]	počáteční délka
L _u	[mm]	délka po přetržení vzorku
n	[-]	exponent deformačního zpevnění
R	[MPa]	smluvní hodnota napětí
R _e	[MPa]	mez kluzu
Re _{0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
R _m	[MPa]	mez pevnosti
r _α	[-]	normálová anizotropie
S	[mm ²]	konečný průřez
s	[mm]	tloušťka vzorku



ZKRATKA NEBO SYMBOL	JEDNOTKY	VÝZNAM
S_0	[mm ²]	počáteční průřez
S_u	[mm ²]	průřez tyče v místě přetržení
T	[°C]	teplota
x_s	[-]	střední hodnota plošné anizotropie
Z	[%]	kontrakce
ZP	[MPa]	zásoba plasticity
ΔL	[mm]	rozdíl délek
ϵ	[%]	poměrné prodloužení
ϵ_b	[-]	skutečná deformace ve směru šířky zkušební tyče
ϵ_u	[-]	máximální trvalé poměrné prodloužení
λ	[°]	úhel mezi napětím σ a směrem kluzu
φ	[-]	poměrná deformace
τ	[MPa]	smykové napětí
τ_{krit}	[MPa]	kritické skluzové napětí
σ	[MPa]	normálové napětí
Φ	[°]	úhel mezi osou válce a normálou ke skluzové rovině

1. Úvod

Velký vývoj světového průmyslu, ekonomiky a zvyšování výroby vede k novým požadavkům na vlastnosti, sortiment a ceny materiálů. Velkým hnacím faktorem co se týče vývoje, výroby a zdokonalování materiálů je automobilový průmysl. Tlak spotřebitelů na výrobu sortimentu těchto materiálů zvyšuje čím dál více nároky na mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti. Dalším důležitým kritériem je cena a výrobní náklady, které určují konkurenceschopnost.

Souhrn výše uvedených vlastností je prioritní pro zvýšení jakosti a bezpečnosti výrobku. Toto hledisko je zvláště důležité v oblasti automobilového průmyslu. Tvorba automobilové karoserie je systém skládající se z řady tvarově složitých dílů s jinými požadavky na materiál.

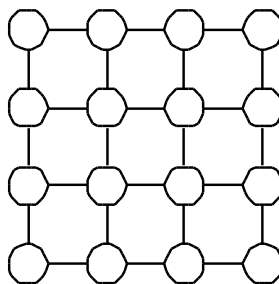
Materiál s názvem TWIP (Twining Induced Plasticity), kterým se budeme v této práci zabírat a zkoumat jeho základní mechanické vlastnosti, je novým trendem v této oblasti. Navazuje na dlouhodobý vývoj. Po materiálech uhlíkových, mikrolegovaných, dvoufázových a martenzitických je svými vlastnostmi zcela jedinečný. Jeho austenitická struktura zaručuje vysokou tažnost a zároveň vysokou pevnost. Vyznačuje se velkou plasticitou a odolností vůči únavě. Výše uvedené vlastnosti mají při použití v automobilovém průmyslu velký důraz na bezpečnost celé karoserie, zejména jako díly použité na nosné části karoserií (výztuhy).

Jeho chemické složení je velice zajímavé, vyznačuje se malým obsahem uhlíku (pod 1 %), dále je vysoce legován manganem (15 – 25 %), hliníkem a malým množstvím křemíku, to vše v austenitické matici. S těmito vlastnostmi a chemickým složením nám doplňuje důležité volné plochy v diagramech (závislostí zatížení a deformace) a pevnostně a plasticky se řadí nad materiály TRIP a martenzitické oceli.

Tento materiál se už ve stádiu vývoje řadí mezi potenciálně důležité v bezpečnosti, kvalitě, životnosti a ceny vyrobených automobilů. Tím se TWIP řadí k mimořádně zajímavým materiálům pro budoucí zpracování.

2. Mechanismy plastické deformace

Nejdůležitějším mechanismem plastické deformace za tepla i za studena je dislokační skluz. Další mechanismus plastické deformace je dvojčatění. Pro materiál TWIP je dvojčatění důležitým druhem deformace. Ostatní materiály využívají spíše dislokačního skluzu [1].



Obr. 2.1 Nedeformovaný krystal

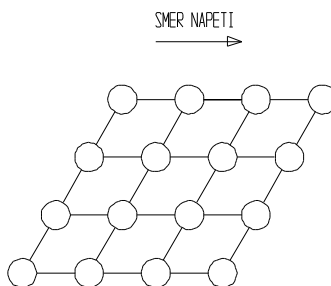
2.1. Elastická deformace

Elastická (pružná) deformace je stav, kdy se materiál po zatížení vrátí zpět do původního tvaru (obr.2.1.1), jedná se o deformaci vratnou. U této deformace platí Hookův zákon $\sigma = E \cdot \varepsilon$ [1].

Kde: E – modul pružnosti v tahu [MPa]
 ε – poměrné prodloužení [MPa]

Pro smykové napětí platí $\tau = G \cdot \gamma$

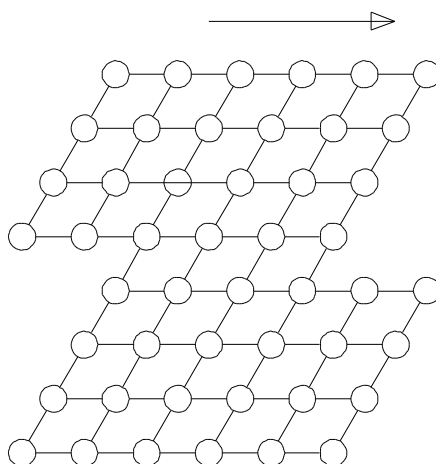
Kde: G – modul pružnosti ve smyku [MPa]



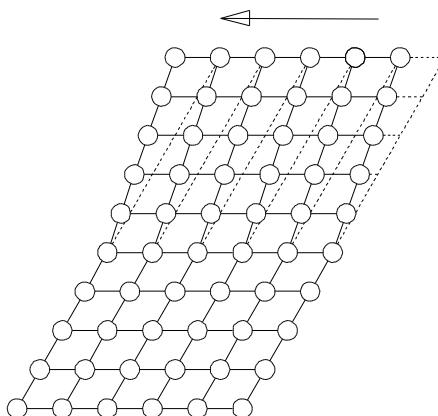
Obr. 2.1.1 Elastická (pružná) deformace

2.2. Plastická deformace

Plastická deformace nastává po překročení jisté meze elasticity, u materiálu začne docházet k trvalým tvarovým změnám. Tyto změny probíhají nejčastěji skluzem, nebo dvojčatěním. Dvojčatění je typické a obzvláště důležité pro námi zkoumaný materiál TWIP [3].



Obr. 2.2.1 Plastická deformace skluzem

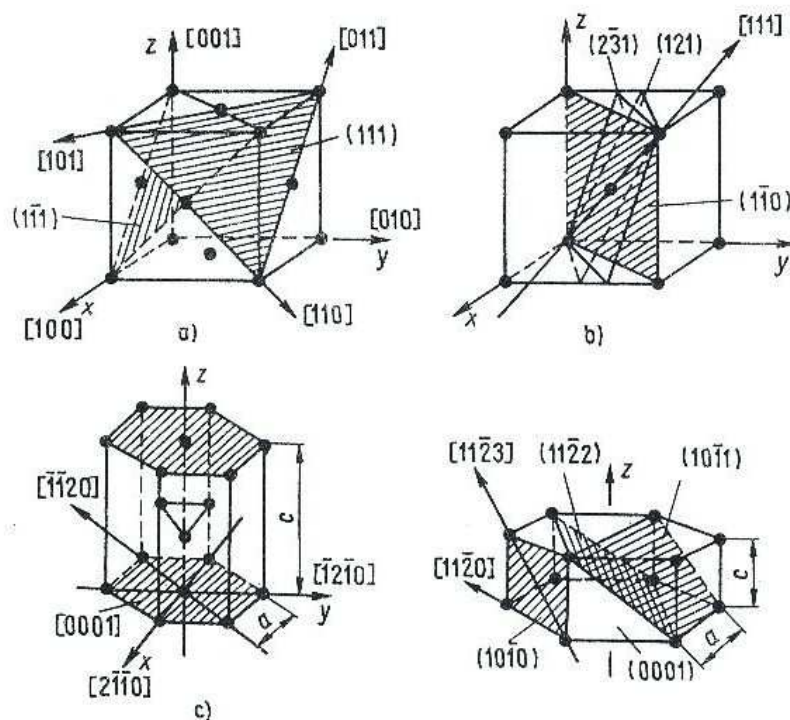


Obr. 2.2.2 Plastická deformace dvojčatěním

3. Plastická deformace skluzem

Plastická deformace v kovech probíhá vzájemným skluzem krystalových bloků podél skluzových rovin. Skluz nejsnáze vzniká v určitých směrech (nejhustěji obsazených ve skluzové rovině) a v určitých rovinách (s nejvyšší atomovou

hustotou). Obecně je kluzná rovina rovinou s největší hustotou atomů a směr skluzu je nejtěsněji uspořádaný směr ve skluzové rovině. Protože jsou roviny s nejvyšší atomovou hustotou současně v krystalové struktuře vzájemně nejvzdálenější, je kluzný odpor v těchto rovinách obecně nižší než pro jinou soustavu rovin. Skluzové roviny a skluzové směry tvoří skluzový systém [1].



Obr. 3.1 Skluzové systémy[1]

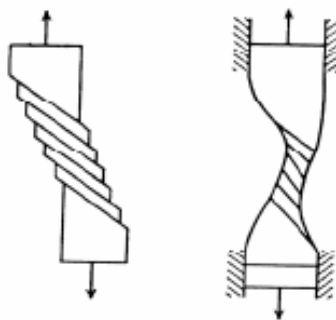
a) v FCC mřížce, b) v BCC mřížce c) v HCP (Zn,Cd,Mg,Co), d) hcp(Ti,Zr)

FCC - face-centered-cubic (kubická,plošně středěná)

BCC - body-centered-cubic (kubická,prostorově středěná)

HCP – hexagonal-close-packed (hexagonální)

Rychlost deformace závisí na počtu, resp. hustotě dislokací. Hustota dislokací je definována jako celková délka dislokační čáry na jednotku objemu nebo jako počet dislokací, které protnou jednotku příčného průřezu [1][2].



a)

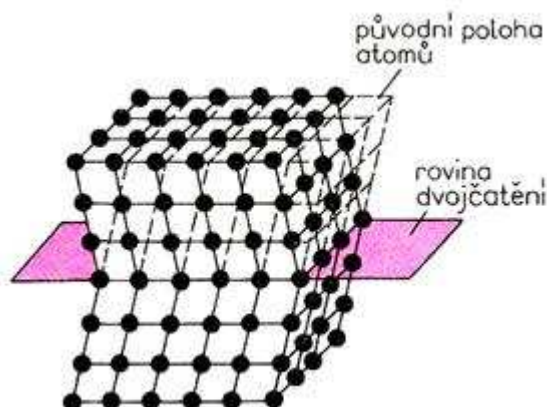
b)

Obr. 3.2 Deformace skluzem při tahové zkoušce [1]

- a) aplikovaná síla nepůsobí v ose
b) reálná zkouška – aplikovaná síla v ose

4. Plastická deformace dvojčatěním

Druhým důležitým mechanismem plastické deformace je tzv. dvojčatění. Při tomto deformačním mechanismu vznikají krystalická dvojčata. Zdvojení krystalu je náhlé přeskupení krystalové mřížky. Při vzniku dvojčat se objevují velmi rychle tenké lamely, jejich šířka se zvětšuje s rostoucím napětím rovnoměrným pohybem rozhraní dvojčete. Nová dvojčata vznikají velice rychle, tento jev bývá doprovázen zvukovými jevy (praskání). Je to proces, při kterém se vytváří podél roviny souměrný zrcadlový obraz krystalografické mřížky. Je – li přiloženo smykové napětí, dojde k vytvoření deformačního dvojčete kolem roviny dvojčatění. Dvojčatěním se většina kovů nedeformuje, lze jej však vyvolat vhodnými podmínkami. Posuv při dvojčatění musí probíhat pohybem dislokací. Napětí způsobující dvojčatění závisí nejen na čárovém napětí dislokačního zdroje, ale také na povrchovém napětí na hranicích dvojčat. Napětí potřebné k dvojčatění bývá větší než napětí skluzové. Při nízkých teplotách (20°C) bude probíhat spíše deformace skluzem, než dvojčatěním. Při snížení teploty (při průběhu deformace) skluzové napětí ještě vzroste. Celkové napětí bude vzrůstat a zvýší se pravděpodobnost, že deformace proběhne dvojčatěním, tzn., že deformace dvojčatěním je ovlivněna teplotou a rychlostí zatěžování. V železe a jeho slitinách nastává dvojčatění za pokojové teploty při rázu.

**Obr. 4. 1** Deformace dvojčatěním [7]

Dvojčatění může být produktem mechanické deformace nebo může nastat při žíhání následujícím plastickou deformaci. Mechanické dvojčatění vzniká v BCC nebo HCP mřížkách za podmínek zatížení vysokými rychlostmi (šokové zatížení) a snížení teploty. FCC kovy obvykle nedvojčatí, ale slitiny Ag – Au a Cu ano, při tahové deformaci a šokovém zatížení u teploty 4 °C. Dvojčatění se projeví „zoubkováním“ na záznamu tahového diagramu [2][6].

Tabulka 4.2 Směry dvojčatění v odlišných mřížkách

struktura	kov	rovina	směr
			Dvojčatní
bcc	α Fe, Ta	(112)	[111]
hcp	Zn, Cd, Mg, Ti	(1012)	[1011]
fcc	Ag, Au, Cu	(111)	[112]

Deformace mřížky při dvojčatění je malá. Význam dvojčatění nespočívá v dosažené deformaci, ale v tom, že je jím vytvořena příznivá orientace v mřížce pro vznik nových skluzových systémů a to především u mřížek s omezeným počtem skluzových systémů (HCP) [2][4][5].

4.1. Kritické napětí při dvojčatění

Kritické napětí u dvojčatění je velice složité, deformace dvojčatěním probíhá při velkých rychlostech deformace a celý jev je velice rychlý. Tím se jen velice těžko dá

stanovit určitá hodnota kritického napětí. Vlivem deformace rázem nabývá kritické napětí velikých hodnot.

4.2. Srovnání deformace skluzem a dvojčatěním

Tabulka 4.2.1 Rozdíly v deformaci skluzem a dvojčatěním

Deformace	Skluz	Dvojčatění
1.	Při skluzu zůstává orientace krystalu nad a pod rovinou skluzu stejná.	U dvojčatění se kolem roviny dvojčatění mění orientace krystalu.
2.	Skluz se odehrává na vzdálenosti násobků meziatomové vzdálenosti.	U dvojčatění je pohyb atomů menší než meziatomová vzdálenost.
3.	Skluz probíhá v relativně vzdálených rovinách.	V oblasti dvojčatění se deformace účastní všechny roviny.

5. Sortiment plechů používaných v automobilovém průmyslu

Oceli na stavbu automobilových karoserií můžeme rozdělit na hlubokotažné a vysokopevnostní plechy, které zajišťují bezpečnost celé karosérie, a na materiály se zvýšenou mezí kluzu s dobrou tvářitelností. Všechny druhy ocelí se vyrábějí různými způsoby termomechanického zpracování s řízeným ochlazováním na teplých širokopásových tratích[2][5].

5.1. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem mají zaručeny mechanické vlastnosti a svojí vysokou tvářitelností jsou předurčeny pro tvarově složité výlisky

(např.: pohledové díly karosérie, na které jsou kladeny i nároky na povrchové vlastnosti). V závislosti na chemickém složení, mechanických vlastnostech a způsobu výroby byly hlubokotažné plechy rozděleny do několika skupin podle kvality [2].

- | | |
|---|------------------------------|
| • CQ (Comercial Quality) | - plechy běžné kvality |
| • DQ (Drawing Quality) | - tažné plechy |
| • DDQ (Deep Drawing Quality) | - hlubokotažné plechy |
| • EDDQ (Extra Deep Drawing Quality) | - zvlášť hlubokotažné plechy |
| • EDDQ-S (Extra Deep Drawing Quality-Super) | - super hlubokotažné plechy |

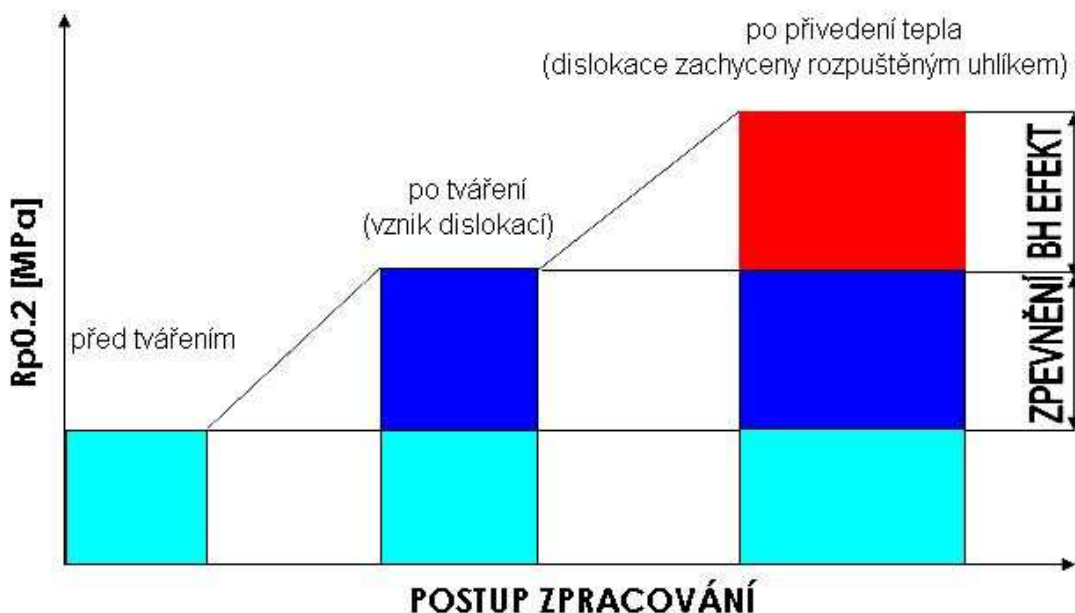
5.2. Plechy z IF ocelí

IF (Interstitials Free Steels), oceli bez intersticií jsou dnes běžně používány pro stavbu automobilové karosérie. Interstiticky rozpustné atomy uhlíku a dusíku jsou vázané ve formě stabilních karbonitridů (TiCN, NbCN). Toho je docíleno mikrolegováním niobem nebo titanem či kombinací obou prvků. Snížením obsahu uhlíku a dusíku ve formě tuhého roztoku dosáhneme výrazného zlepšení plastických vlastností oceli. Výsledné mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou také závislé na obsahu dalších legujících prvků způsobujících roztokové zpevnění jako jsou například mangan a fosfor, dále pak na množství a rozptýlení precipitátů, velikosti feritického zrna a na úběru při hladícím válcování [2].

5.3. Oceli s BH efektem

BH (Bake Hardened Steel), efekt - je jakákoliv vysokopevnostní ocel, u níž je zvýšení pevnosti výsledkem kombinace deformace a stárnutí při teplotách a časech typických pro lakování části automobilu. Používají se u velkoplošných výlisků (střecha, dveře, kapota). Vyznačují se nízkou mezí kluzu, po zpracování a vypálení laku se zvýší mez kluzu o 30 – 80 MPa. Proces zpevnění po lisování a vypálení laku souvisí s deformačním stárnutím za tepla, které je podmíněné difúzí atomů uhlíku a dusíku k dislokacím vytvořeným v průběhu lisování. BH efekt se realizuje precipitačním zpevněním mikrolegujících prvků. Prvky, které mají vysoký vliv na BH

efekt, jsou mangan, křemík a fosfor. Jedná se o feritickou ocel s množstvím hliníku a dalšími mikrolegujícími prvky, které mají vliv na konečné zpevnění [2].



Obr. 5.3.1. Princip BH efektu

5.3.1. Oceli se zvýšeným obsahem uhlíku

Množství legujících prvků titanu a niobu je pouze na takové úrovni, aby část intersticiálně rozpuštěného uhlíku ve feritové mřížce zůstala i po válcování za tepla nevázaná na vzniklé karbidy legur. BH efekt potom probíhá za nižších teplot vypalování laku nebo žíhání [2].

5.3.2. Oceli se zvýšeným obsahem titanu resp. niobu

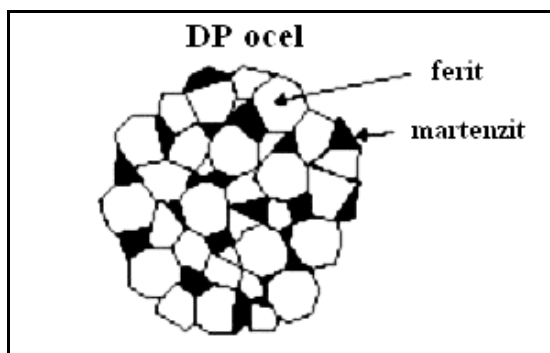
Intersticiální uhlík se při tváření těchto plechů prakticky nevyskytuje ve formě tuhého roztoku, proto je zaručena jejich vynikající hlubokotažnost. Vytvrzení se docílí rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žíhání na kontinuální žíhací lince s okamžitým rychlým ochlazením. Výroba těchto ocelí je tedy více energeticky náročná než u ocelí se zvýšeným obsahem [2].

5.4. Vysokopevnostní materiály

Jedním z možných způsobů snížení hmotnosti karosérie automobilu je redukce tloušťky plechu pohledových dílů. Pro tento případ je ovšem nutné nahradit takovéto díly vyrobené z klasických IF ocelí plechy se zvýšenými mechanickými vlastnostmi. Proto byly vyvinuty plechy z vysokopevnostních ocelí. Tyto materiály vykazují vyšší exponent deformačního zpevnění než klasické IF oceli a IF oceli s BH efektem [2].

5.4.1. DP oceli (Dual Phase)

DP (Dual Phase), dvoufázové oceli mají feritickou matici obsahující 20% až 70% malých ostrůvků martenzitu nebo bainitu. V materiálu je ponecháno větší množství uhlíku pro lepší kalitelnost a jsou do něj přidány legury manganu, chromu, vanadu a niklu. Uhlík podporuje tvorbu martenzitu a současně zpevňuje ferit ve formě tuhého roztoku nebo jej lze použít pro BH efekt. U těchto ocelí mez kluzu nedosahuje ani 70% meze pevnosti ($R_m \approx 1000 \text{ MPa}$), což je výhodné pro tváření [2].

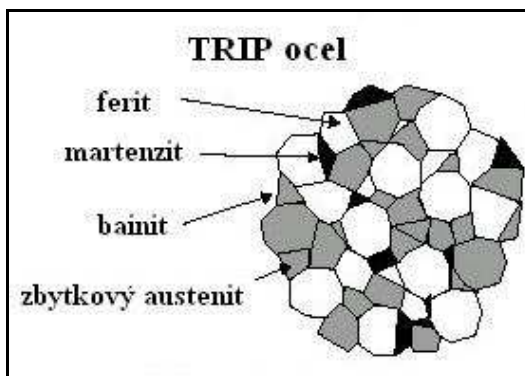


Obr. 5.4.1.1 Struktura DP ocelí [2]

5.4.2. TRIP oceli (Transformation Induced Plasticity)

TRIP (Transformation Induced Plasticity), oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Někdy se tyto TRIP materiály také nazývají oceli se zbytkovým austenitem. Jsou tvořeny feritem, bainitem a malým množstvím nepřeměněného zbytkového austenitu. Ten se během tváření přemění na tvrdý martenzit nebo se stabilizuje obr. 5.4.2.1. Tyto oceli obsahují větší množství uhlíku, křemíku, případně

hliníku než DP oceli a tím se sníží teplota M_f pod teplotu okolí, čímž se vytvoří zbytkový austenit. Při nižším obsahu uhlíku v materiálu může dojít k vysokému zpevnění oceli již v průběhu tváření vlivem předčasného přetvoření austenitu. Při vyšším obsahu uhlíku zůstává austenit nepřetvořen i po tvářecím procesu. Tím se zvyšuje schopnost materiálu pohltit deformační energii například při nárazu automobilu na překážku[2].



Obr. 5.4.2.1 Struktura TRIP ocelí

5.4.3. CP oceli (Complex Phase)

CP (Complex Phase), více fázové oceli s jemnou strukturou, která je tvořena feritem, bainitem (horním i dolním), martenzitem a austenitem. Výroba a složení legur jsou podobné jako u DP a TRIP ocelí. Tyto oceli jsou mikrolegovány niobem, titanem či vanadem pro vytvoření jemného precipitátu. CP oceli vykazují vysoký stupeň deformačního zpevnění, mají velmi dobrou rozměrovou stálost výlisků a také mají dobrou schopnost absorbovat deformační energii při nárazu[2].

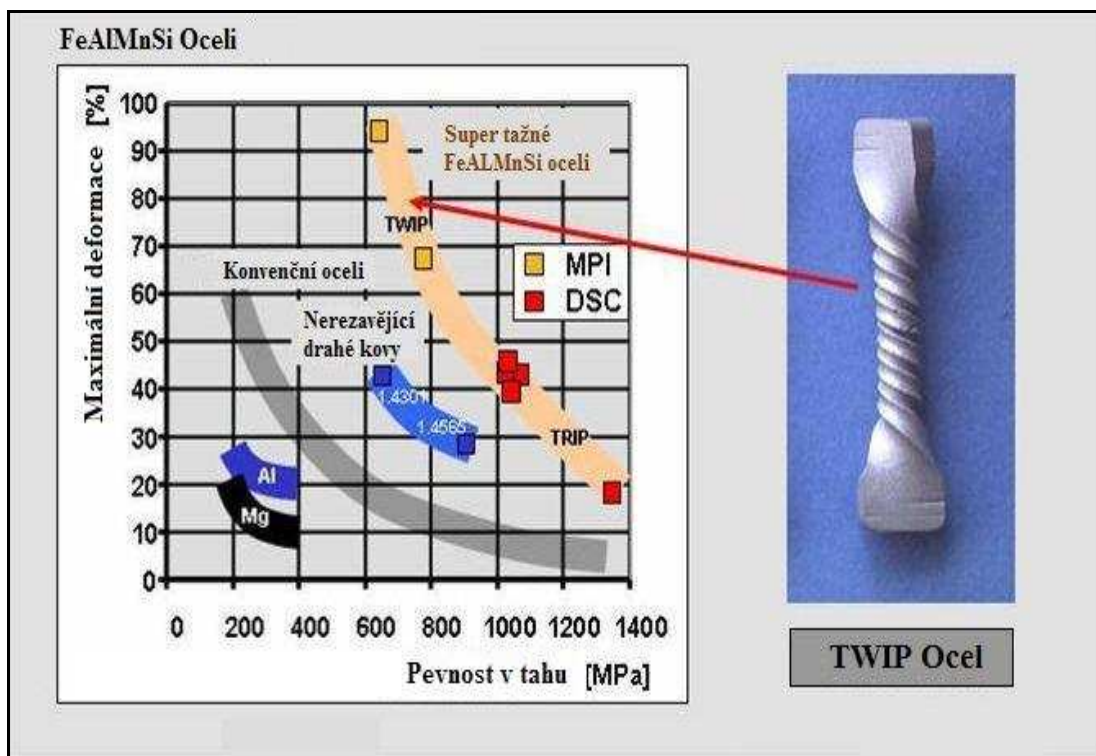
5.4.4. Martenzitické oceli

Martenzitické oceli jsou při své výrobě kalitelné a patří k nim i bórové oceli. V těchto ocelích je téměř všechn austenit transformován (během ochlazování na válcovací trati nebo následným ochlazováním ze žíhacích teplot) na martenzit. Jsou to materiály s mezí pevnosti, která může dosahovat i hodnot větších než 1500 MPa. Bývají popuštěny pro zlepšení jejich tažnosti, ale i tak se příliš nehodí pro tváření složitých dílů. Pro lepší kalitelnost je v těchto ocelích ponechán uhlík a jsou i

legovány manganem, křemíkem, chromem, molybdenem, bórem, vanadem a niklem[2].

5.5. TWIP oceli (Twinning Induced Plasticity)

TWIP (Twinning Induced Plasticity), oceli se zdvojenou indukovanou plasticitou obsahují v austenitické matici 15-25% Mn a dostačující množství Al a Si.



Obr.5.5.1 TWIP oceli (ukázka) [2]

Jsou velmi vhodnými materiály pro nosné díly konstrukce karosérie, které jsou vystaveny nadměrnému zatížení. TWIP oceli mají velmi vysokou pevnost a to až (1000 MPa) a dobrou tvářitelnost (při nízké teplotě a vysoké rychlosti deformace). Pro dosažení TWIP účinku je nutné zajistit přesné složení slitiny takovým způsobem, že transformační energie nedovolí napětově indukovanému austenitu přeměnit se na martenzit a dojde tak k mechanickému dvojčatění. Také je nutné zajistit dodržení předepsaných technologických postupů.

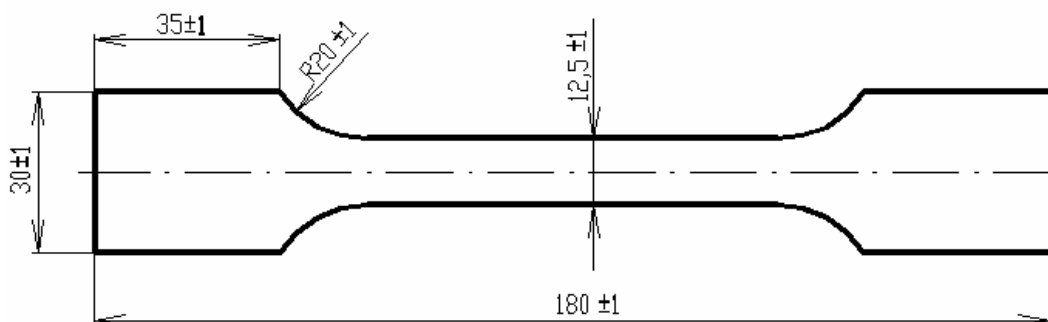
Jak bylo napsáno v úvodu sortimentu plechů, výroba TWIP ocelí probíhá termomechanickým zpracováním s řízeným ochlazováním na tepelných širokopásových tratích, Stecllových tratích a ve válcovnách tlustých plechů vybavených kvatrostolicemi. Pro oceli platí, že s jejich rostoucí pevností klesá

plasticita. Tímto válcováním se mění struktura, fáze a mechanické vlastnosti oceli [4][5].

TWIP oceli se vyznačují velkou tažností až přes 40%. TWIP ocel má tedy pro své zcela specifické vlastnosti obrovský potenciál v automobilovém průmyslu jako dobře tvářitelný a vysokopevnostní materiál současně, což se dá využít zvláště pro nosné díly karoserie[2],[4].

6. Statická zkouška tahem

Patří k nejdůležitějším zkouškám určujícím základní hodnoty mechanických vlastností. Tahová zkouška je jednou ze základních zkoušek a je předepsaná pomocí normy: ČSN EN 10002-1. Podle této normy mohou být zkušební tyče tzv. poměrné nebo nepoměrné. Tahová zkouška se provádí na výše uvedených zkušebních tyčích. Zkušební tyč je upnuta do čelistí stroje a leží v ose stroje tak, aby síla procházela osou zkušební tyče. Při namáhání zvětšující se tahovou silou dochází k deformaci zkušební tyče a prodlužování až do přetržení. Tahová zkouška probíhá ve dvou fázích. V první fázi je deformace rovnoměrná s jednoosým stavem napjatosti, v druhé fázi vznikne krček (zúžení) a deformace je nerovnoměrná. Stroj během zkoušky zaznamenává zatěžující sílu a příslušnou deformaci zkušební tyče. Tyč se prodlužuje z počáteční naměřené délky L_0 na konečnou délku po přetržení L a počáteční plocha S_0 se mění na plochu po přetržení S . Podíl zatížení a plochy S_0 se nazývá smluvní, nebo také jmenovité napětí [2].



Obr. 6.1.0.1 Zkušební tyč pro A₅₀ [2]

6.1. Vyhodnocení zkoušky

Z tahové zkoušky lze určit různé charakteristiky materiálu, jako např. tažnost A, kontrakce Z, mez pevnosti R_m , mez kluzu R_e nebo smluvní mez kluzu $R_{e0,2}$ a další základní níže uvedené vlastnosti.

Skutečné napětí a poměrné prodloužení

Vztahy pro skutečné napětí a poměrné prodloužení

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (6.1.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6.1.2)$$

kde:

F	- tahová síla [N]
S_0	- původní průřez [mm ²]
ΔL	- rozdíl délek [mm]
L_0	- původní délka [mm]

Výrazná mez kluzu R_e je definována jako počátek plastických deformací. Jedná se tedy o napětí, při jehož dosažení dochází k plastické deformaci bez přírůstku zatížení. Někdy lze ještě rozlišit horní mez kluzu R_{eH} a R_{eL} (např. pro deformačně vystárlé materiály). Lze ji určit jako:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (6.1.3)$$

kde: F_e - síla odpovídající výrazné mezi kluzu [N]

Nevýrazná mez kluzu $R_{e0,2}$ se určuje jako napětí odpovídající trvalé absolutní deformaci $\Delta L = 0,2\%$ ($\varepsilon = 0,002$) a počítá se jako:

$$R_{e0,2} = \frac{F_{e0,2}}{S_0} \quad (6.1.4)$$

kde: $F_{p0,2}$ - síla odpovídající trvalé absolutní deformaci 0,2% [N]

Mez pevnosti R_m je napětí odpovídající maximální síle F_{max} naměřené v celém průběhu zkoušky. Spočítá se tedy jako:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (6.1.5)$$

kde: F_{\max} - maximální naměřená síla [N]

Tažnost A_x je dána jako maximální poměrné trvalé prodloužení ε_u vyjádřené v [%]. Lze tedy napsat:

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (6.1.6)$$

$$A_x = 100\varepsilon_u = 100 \frac{\Delta L_u}{L_0} \quad (6.1.7)$$

kde: L_u - délka po přetržení vzorku [mm]
 ε_u - maximální poměrné trvalé prodloužení [-]

Smluvní napětí a poměrná deformace

Mezi smluvním a skutečným napětím platí tyto vztahy

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad (6.1.8)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6.1.9)$$

Kde: R - smluvní napětí [MPa]
 ε - poměrné prodloužení [%]
 σ - skutečné napětí [MPa]
 φ - poměrná deformace [-]

Kontrakce Z (zúžení) se v technické praxi většinou používá pouze u kruhových tyčí jako procentuální poměr příčného průřezu po přetržení tyče S_u vůči počátečnímu průřezu S_0 . Spočítá se jako:

$$Z = 100 \frac{\Delta S}{S_0} = 100 \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad [\%] \quad (6.2.1)$$

kde: S_u - průřez tyče v místě přetržení [mm²]

Zásoba plasticity ZP je dalším podstatným parametrem především pro hluboké tažení plechů, která zohledňuje i tažnost daného materiálu:

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon_R \quad [\text{MPa}] \quad (6.2.2)$$

k - koeficient = 1, 2, 3... [-]

Exponent deformačního zpevnění n

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad [\text{MPa}] \quad (6.2.3)$$

kde: K - koeficient pevnosti [MPa]
n - exponent deformačního zpevnění [-]
 ε - skutečná deformace [-]

Ukazatel hlubokotažnosti vychází ze vztahu (6.2.4).

$$UH = \frac{R_{e0,2}}{R_m} [-] \quad (6.2.4)$$

Kde : $R_{e0,2}$ - Mez kluzu [MPa]
 R_m - Mez pevnosti [MPa]

Komplexní ukazatel tažnosti je určen vztahem (6.2.5), je ovlivněn mezí kluzu, mezí pevnosti a tažností, takže je přímo uměrný velikosti těchto hodnot.

$$KUT = \left(\frac{R_{e0,2}}{R_m} \right) * A_{50} [-] \quad (6.2.5)$$

Kde: $R_{e0,2}$ - Mez kluzu [MPa]
 R_m - Mez pevnosti [MPa]
 A_{50} - Tažnost [%]

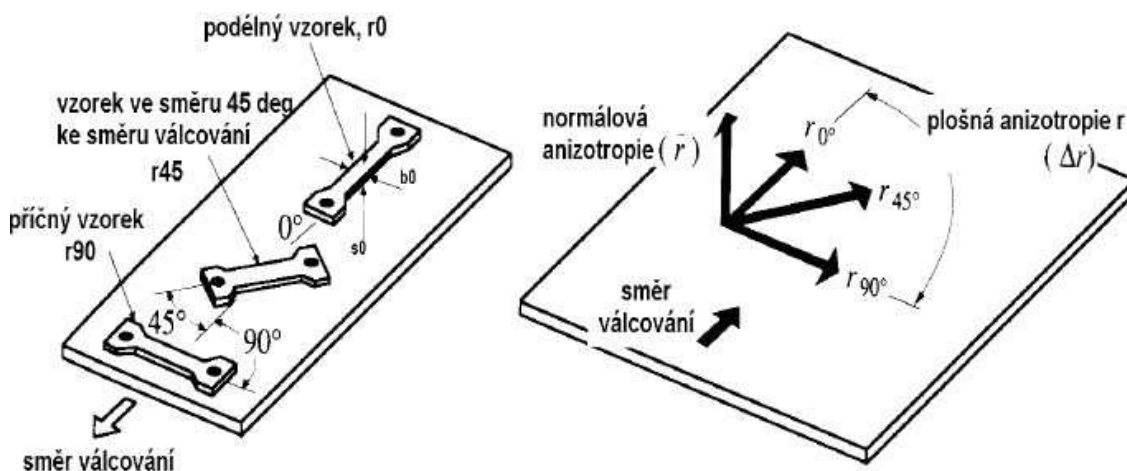
7. Anizotropie

Anizotropií se rozumí nestejnoměrnost vlastností v různých směrech souřadného systému. Při posuzování anizotropie plechů se rozlišuje anizotropie plošná (v rovině plechu) a normálová (ve směru tloušťky plechu). U válcovaných plechů dochází vlivem válcování v jednom směru ke vzniku rozdílných pevností a plastických vlastností vzhledem ke směru válcování. Tyto rozdíly zjišťujeme pomocí tzv. součinitele plastické anizotropie plechů a pásů (viz ČSN ISO 10113). Rozhodující vliv

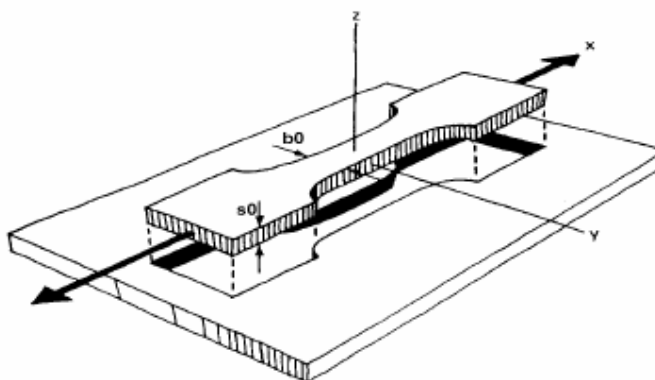
na anizotropii má textura. Textura je výsledkem tváření a tepelného zpracování. Při posuzování anizotropie používáme přístříhy vystřížené v různých směrech válcování (obr.7.1.1). Tyto vzorky na začátku zkoušky změříme a poté zatěžíme do předepsaného napětí, po dosažení potřebného zatížení vzorky změříme znovu, získané údaje použijeme k níže uvedeným výpočtům. Čím nižší má materiál anizotropii, tím je stejnorodější v různých směrech. Nejlepší anizotropii mají vzorky ve směru válcování [3] [6].

7.1. Normálová anizotropie

Při posuzování anizotropie je materiál považován za homogenní, charakterizovaný třemi osami anizotropie. Osa x se ztotožňuje se směrem válcování, který se označuje jako směr 0° [3][6].



Obr. 7.1.1 Vzorky pro anizotropii



Obr. 7.1.2 Vzorky pro anizotropii

Vzorec (7.1.1) se dá rozepsat, ve jmenovateli nám vznikne vztah $\ln(b_1/b_0)$ a v čitateli budeme mít vztah tvar $\ln(S_0/S_1)$. Čítec se dá napsat jako logaritmus součinu délky a šířky a tím se nám vztah zjednoduší pouze na počáteční a konečné rozměry.

Normálová anizotropie r_α (4.1.2) [3].

$$r_\alpha = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} \quad [-] \quad (7.1.1)$$

kde: ε_b – skutečná deformace ve směru šířky zkušební tyče [-]

$$r_i = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{s_0}{s_k}} = \frac{\ln \left(\frac{b_1}{b_0} \right)}{\ln \left(\frac{L_0 \cdot b_0}{L_1 \cdot b_1} \right)} \quad (7.1.2)$$

kde: b šířka vzorku [mm]
 s tloušťka vzorku [mm]
 r_α je směrový hodnota r [-]

7.2. Plošná anizotropie

Význam charakteristik n a r_α spočívá ve stejnoměrnějším rozdělení plastických přetvoření v nejvíce namáhaných místech výlisku v důsledku přemístění deformací z míst s vysokým počátečním napětím do míst s nižším. Tyto charakteristiky vykazují i značnou plošnou anizotropii. Zjištění její velikosti je možné s použitím vztahu pro směrově střední hodnotu x_s (7.2.1) [3].

$$x_s = \frac{1}{4} \cdot (x_0 + x_{90} + 2 \cdot x_{45}) \quad (7.2.1)$$

kde: x – představuje r nebo n [-]

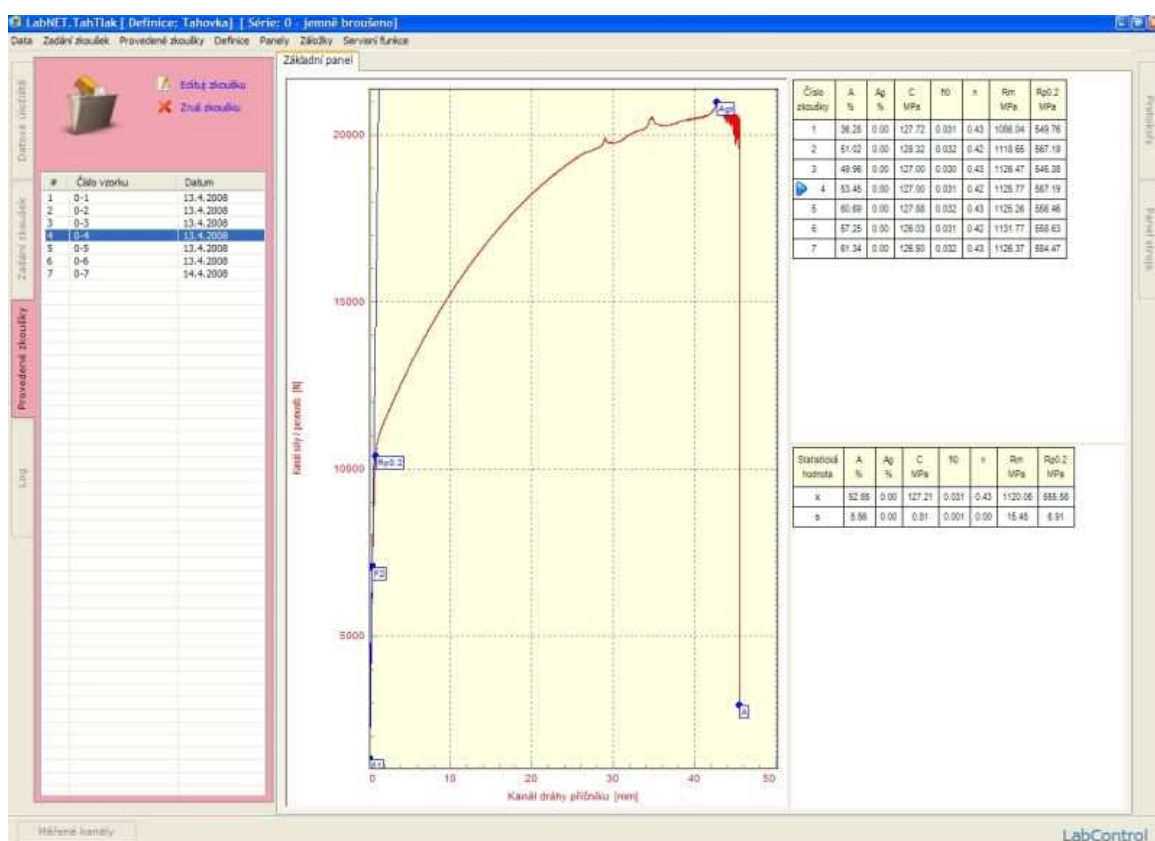
8. Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem byla provedena v tribologické laboratoři TUL, katedry Strojírenské technologie. Zkoušky proběhly na stroji TIRA test 2300 dle normy ČSN EN 10002 – 1.



Obr. 8.1 Trhací stroj TIRA 2300

Všechny vzorky byly trhány rychlostí 10 mm/min a pro každý směr válcování bylo provedeno 5 měření. Měření bylo prováděno v softweru Lab Test 4. (prostředí Lab Test 4 na obr. 8.2) v tribologické laboratoři TUL. Na obr.8.0.2 je znázorněno jedno z měření.



Obr. 8.2 Prostředí softwaru Lab Test 4.

8.1. Hodnoty mechanických vlastností

V této kapitole jsou uvedeny tabulky s výsledky jednotlivých měření. Výsledky jsou uvedené pro všechny směry odebrání. Kromě jednotlivých měření jsou uvedeny i tabulky se středními hodnotami mechanických vlastností a výběrovou směrodatnou odchylkou s.

Tabulka 8.1.1 Mechanické hodnoty zkoušky tahem pro směr 0°

Směr odebrání 0°	Mez pevnosti	Smluvní mez kluzu	Tažnost	Ukazatel hlubokotažnosti	Komplexní ukazatel hlubokotažnosti
	R_m	$R_{p0.2}$	A_{50}	UH	KUT
	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[-]
1.	1118,65	567,21	51,02	0,5070	25,870
2.	1125,77	557,19	53,45	0,4949	26,455
3.	1125,26	556,45	60,69	0,4945	30,012
4.	1131,77	558,63	57,25	0,4936	28,258
5.	1126,37	554,47	61,34	0,4923	30,195

Tabulka 8.1.2 Mechanické hodnoty zkoušky tahem pro směr 0°

Směr odebrání 0°	Koeficient zpevnění		Exponent deformačního zpevnění	
	C		n	
	[MPa]	[±]	[-]	[±]
1.	2378,45	0,869	0,42557	0,00019
2.	2377,87	0,835	0,42755	0,00019
3.	2388,21	0,899	0,43063	0,00020
4.	2376,32	0,976	0,42634	0,00022
5.	2388,05	0,806	0,43231	0,00018

Tabulka 8.1.3 Střední mechanické hodnoty a směrodatná odchylka měření pro směr 0°

Směr odebrání 0°	Mez pevnosti	Smluvní mez kluzu	Tažnost	Koeficient zpevnění	Exponent deformačního zpevnění	Ukazatel hlubokotažnosti	Komplexní ukazatel hlubokotažnosti
	R _m	R _{p0,2}	A ₅₀	C	n	UH	KUT
	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[-]	[-]	[-]
Střední hodnota	1125,56	558,79	56,75	2381,78	0,42848	0,4965	28,158
s	4,666431	4,940142	4,4879	5,848	0,002881	0,006002	1,983391

Tabulka 8.1.4 Mechanické hodnoty zkoušky tahem pro směr 45°

Směr odebrání 45°	Mez pevnosti	Smluvní mez kluzu	Tažnost	Ukazatel hlubokotažnosti	Komplexní ukazatel hlubokotažnosti
	R _m	R _{p0,2}	A ₅₀	UH	KUT
	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[-]
1.	1143,09	585,09	62,81	0,5118	32,149
2.	1135,95	584,67	62,37	0,5147	32,102
3.	1165,22	613,52	57,46	0,5265	30,254
4.	1154,99	586,11	61,64	0,5075	31,280
5.	1149,65	573,13	56,82	0,4985	28,326

Tabulka 8.1.5 Mechanické hodnoty zkoušky tahem pro směr 45°

Směr odebrání 45°	Koeficient zpevnění		Exponent deformačního zpevnění	
	C		n	
	[MPa]	[±]	[-]	[±]
1.	2395,85	1,479	0,42592	0,03826
2.	2370,40	1,017	0,42313	0,00023
3.	2414,77	0,812	0,41347	0,00018
4.	2355,82	1,031	0,41927	0,00023
5.	2363,35	0,984	0,43089	0,00022

Tabulka 8.1.6 Střední mechanické hodnoty a směrodatná odchylka měření pro směr 45°

Směr odebrání 45°	Mez pevnosti	Smluvní mez kluzu	Tažnost	Koeficient zpevnění	Exponent deformačního zpevnění	Ukazatel hlubokotažnosti	Komplexní ukazatel hlubokotažnosti
	R _m	R _{p0,2}	A ₅₀	C	n	UH	KUT
	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[-]	[-]	[-]
Střední hodnota	1149,78	588,50	60,22	2380,04	0,42254	0,5118	30,822
s	11,19799	14,95198	2,8515	24,5685	0,006604	0,010251	1,593730

Tabulka 8.1.7 Mechanické hodnoty zkoušky tahem pro směr 90°

Směr odebrání 90°	Mez pevnosti	Smluvní mez kluzu	Tažnost	Ukazatel hlubokotažnosti	Komplexní ukazatel hlubokotažnosti
	R _m	R _{p0,2}	A ₅₀	UH	KUT
	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[-]
1.	1156,40	595,74	52,17	0,5152	26,876
2.	1154,55	588,95	58,55	0,5101	29,867
3.	1141,62	598,72	55,21	0,5244	28,955
4.	1150,11	597,69	57,30	0,5197	29,778
5.	1168,28	605,09	64,40	0,5179	33,355

Tabulka 8.1.8 Mechanické hodnoty zkoušky tahem pro směr 90°

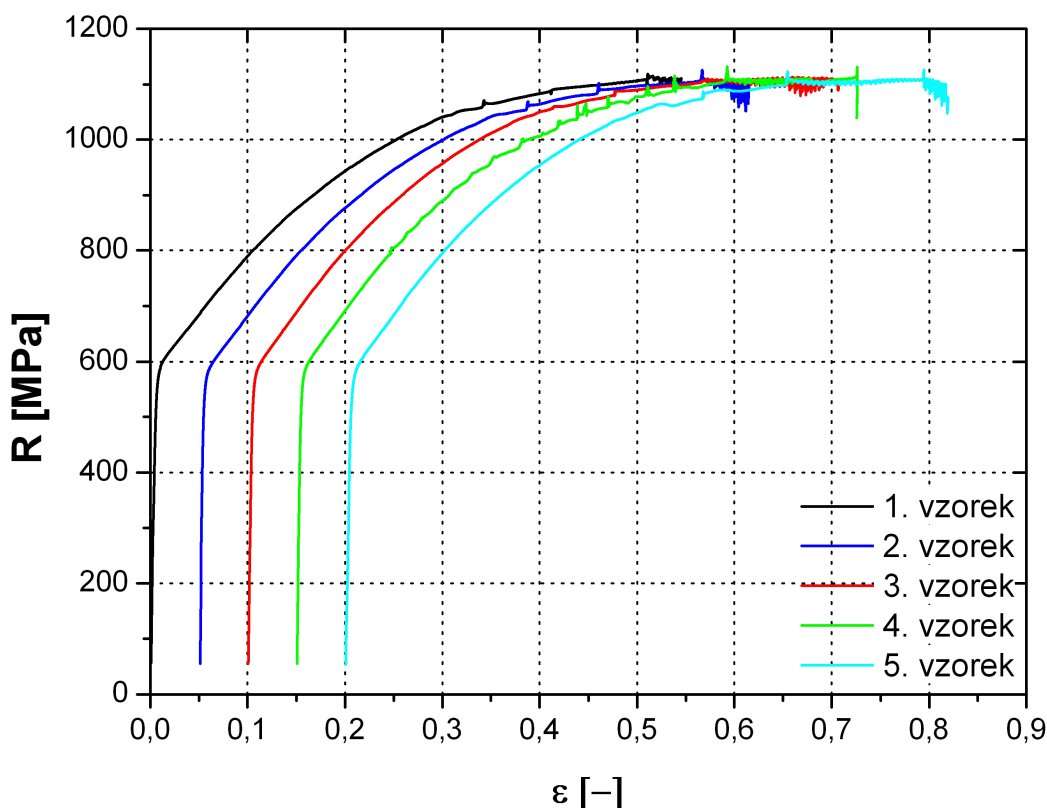
Směr odebrání 90°	Koeficient zpevnění		Exponent deformačního zpevnění	
	C		n	
	[MPa]	[±]	[-]	[±]
1.	2378,45	0,869	0,42557	0,00019
2.	2377,87	0,835	0,42755	0,00019
3.	2388,21	0,899	0,43063	0,00020
4.	2376,32	0,976	0,42634	0,00022
5.	2388,05	0,806	0,43231	0,00018

Tabulka 8.1.9 Střední mechanické hodnoty a směrodatná odchylka měření pro směr 90°

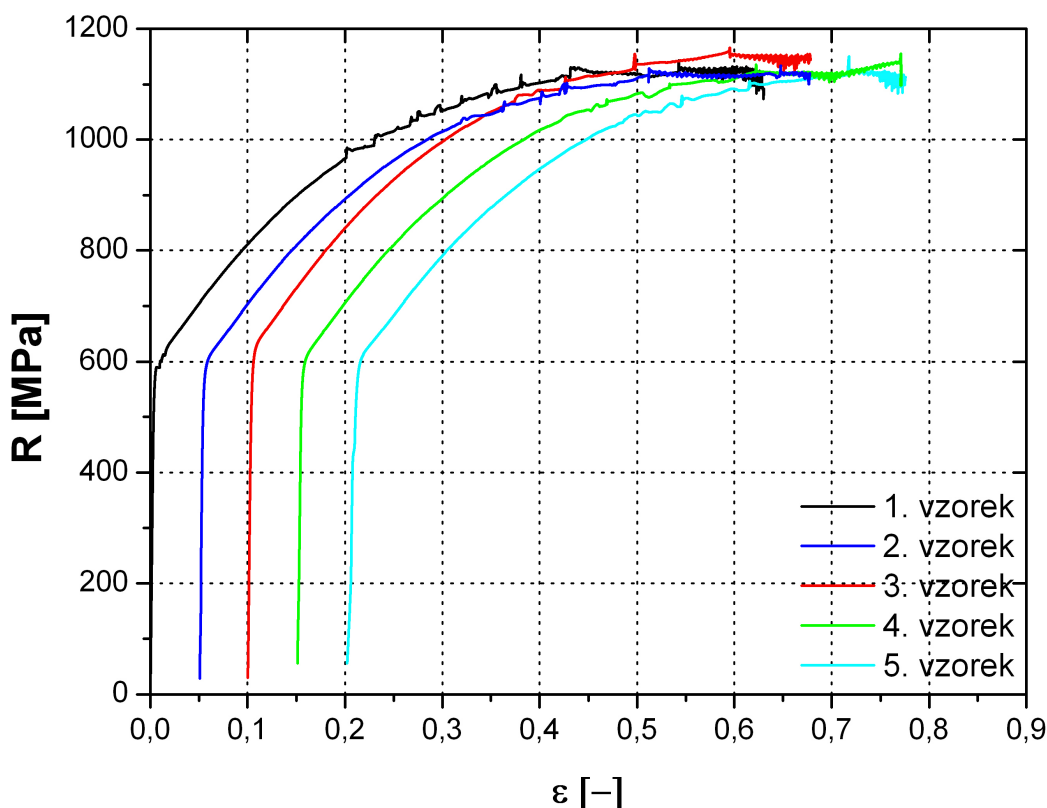
Směr odebrání 45°	Mez pevnosti	Smluvní mez kluzu	Tažnost	Koeficient zpevnění	Exponent deformačního zpevnění	Ukazatel hlubokotažnosti	Komplexní ukazatel hlubokotažnosti
	R_m	$R_{p0.2}$	A_{50}	C	n	UH	KUT
	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[-]	[-]	[-]
Střední hodnota	1154,19	597,24	57,53	2349,16	0,41383	0,5175	29,766
s	9,723593	5,809249	4,5388	29,317	0,003095	0,005320	2,339798

8.2. Průběhy napětí u zkoušených vzorků

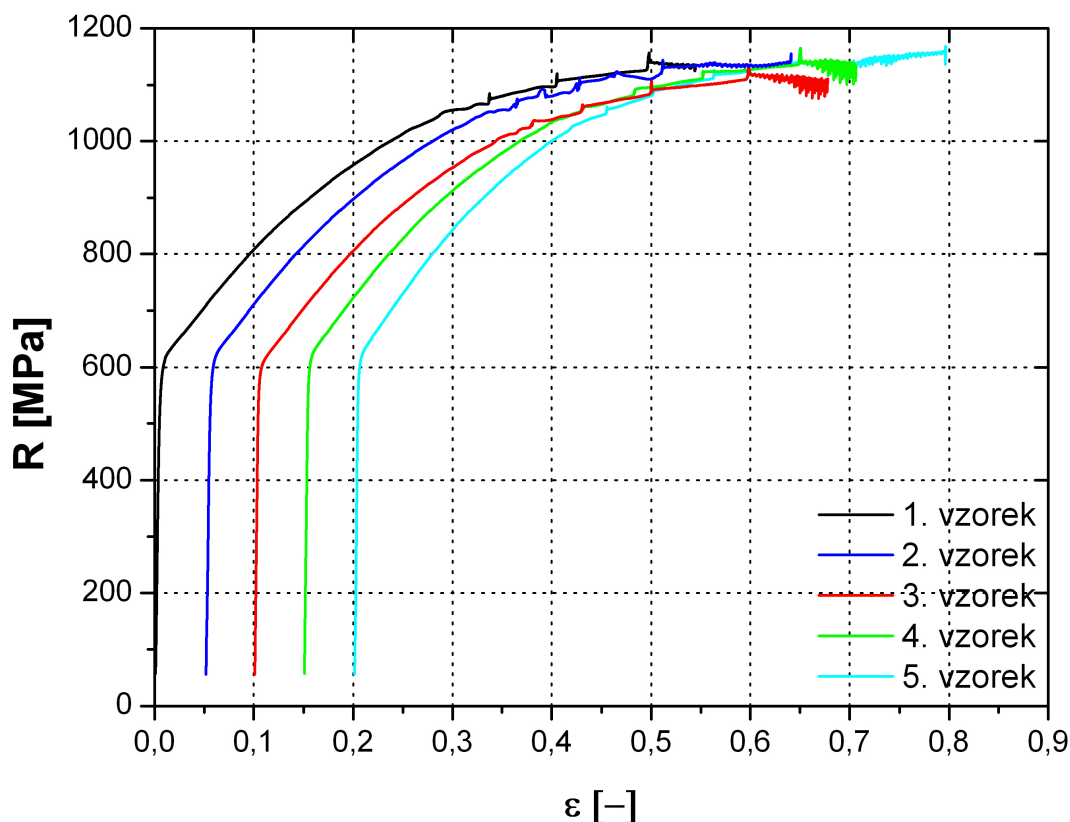
Jak bylo psáno výše, pro každý směr jsme provedli pět tahových zkoušek. Z naměřených dat jsme vypočetli základní mechanické vlastnosti. Tahové diagramy byly zpracovány v softwaru Origin Pro 7.5. Níže jsou uvedené všechny tahové diagramy.

Tahové zkoušky pro směr 0°**Obr. 8.2.1** Tahové diagramy vzorků pro směr 0°

Tyto vzorky jsou odebrané ve směru válcování. Podle průměrných výsledků tahových zkoušek vykazují vzorky odebrané ve směru 0° nižší mechanické vlastnosti než v ostatních směrech. Vykazují nejnižší průměrnou mez pevnosti a mez kluzu, také nejnižší tažnost, ukazatel hlubokotažnosti a komplexní ukazatel tažnosti. Vzorky mají nejvyšší průměrný koeficient tvářítnosti a index deformačního zpevnění. Pro jednodušší srovnatelnost je všech pět vzorků umístěno v jednom grafu na obr. 8.2.1. Z obr. 8.2.1 je vidět, že průběhy napětí u všech vzorků jsou jen málo odlišné, tím získáváme celkem přesné průměrné hodnoty. Kmitavé výchylky u tahových diagramů znázorňují deformaci dvojčatěním, která je základní deformací u námi zkoumaného materiálu. Tyto výchylky znázorňují dvojčatění a na grafech jsou dobře viditelné už v oblasti plastické deformace. Nejintenzivnější deformace je vidět těsně před přetržením.

Tahové zkoušky pro směr 45°**Obr. 8.2.2** Tahové diagramy vzorků pro směr 45°

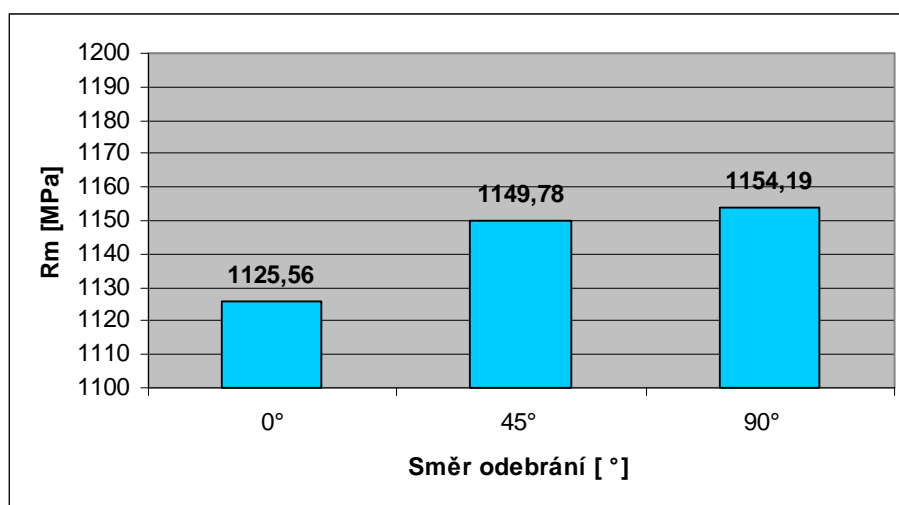
Vzorky odebrané ve směru 45° vykazují středně vysoké hodnoty mechanických vlastností. Střední hodnotu vykazuje mez pevnosti, mez kluzu, exponent deformačního zpevnění, koeficient tvážitelnosti a ukazatel hlubokotažnosti. Vzorky v tomto směru vykazují nejvyšší střední hodnotu tažnosti a nejvyšší střední komplexní ukazatel tažnosti. Tyto vzorky mají souhrnně nejlepší mechanické vlastnosti díky vysoké tažnosti za středně vysokých pevnostních mezí. U vzorku 1. na obr. 8.2.2 je nejlépe viditelná deformace dvojčatěním. Je dobře pozorovatelná už od poměrného prodloužení 0,2 a malé rozkmitání je pozorovatelné už při překračování meze kluzu. Tato deformace pozorovatelná v diagramech jako kmitavé výkyvy, je dobře viditelná i na ostatních vzorcích a je výraznější než u vzorků ve směru 0°. Větší tažnost a lépe pozorovatelné dvojčatění je důsledkem směru odebraných vzorků. Opět je nejintenzivnější deformace patrná těsně před přetržením.

Tahové zkoušky pro směr 90°**Obr. 8.2.3** Tahové diagramy vzorků pro směr 90°

Vzorky odebrané ve směru 90° (kolmý na směr válcování) vykazují nejvyšší střední hodnoty meze pevnosti a meze kluzu. Ze všech tří vzorků mají nejnižší střední hodnotu koeficientu zpevnění a exponentu deformačního zpevnění. Střední hodnota tažnosti, ukazatele hlubokotažnosti a komplexního ukazatele tažnosti je nižší než u vzorků odebraných ve směru 45° a vyšší než u vzorků ze směru 0°. U vzorků je dobře pozorovatelná deformace dvojčatěním, nejlépe u vzorků 1. 2. a 3. (obr. 8.2.3), kde jsou vidět velké výkmity a to již při hodnotách poměrného prodloužení 0,3. Jako u předchozích vzorků je velice intenzivní deformace dvojčatěním pozorovatelná těsně před přetržením (dosažením meze pevnosti) a to zvláště u vzorků 3. a 4. Z deformačního a pevnostního hlediska jsou vzorky srovnatelné s předchozími, mají sice výrazně menší tažnost, ale za vyšších pevnostních podmínek a srovnatelného ukazatele hlubokotažnosti.

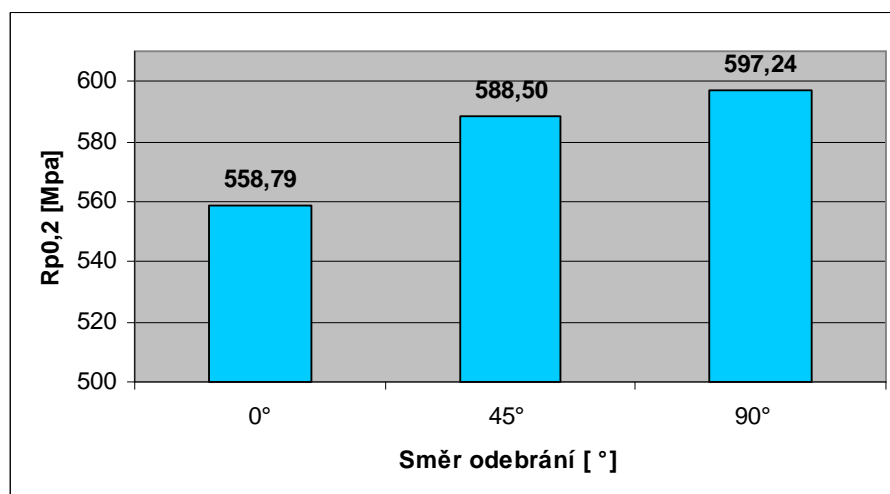
8.3. Porovnání výsledků mechanických vlastností v závislosti na směru odebraného vzorku

Pro lepší orientaci v rozdílech velikostí mechanických vlastností v jednotlivých směrech jsme v následujících tabulkách vynesli velikosti hodnot v závislosti na směru do grafů.



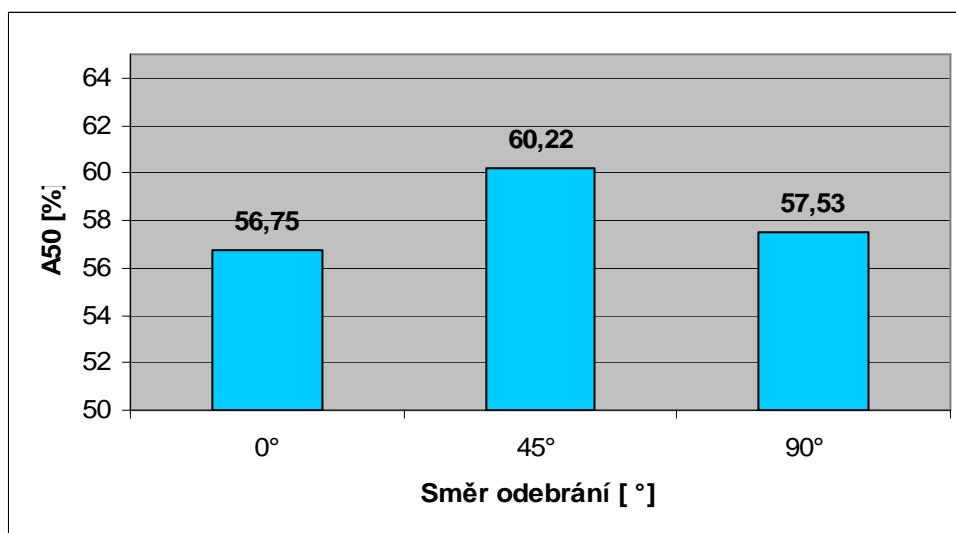
Obr. 8.3.1. Závislost meze pevnosti na směru odebraného vzorku

Velikosti středních hodnot mezí pevnosti jsou znázorněny v grafu na obr. 8.3.1. Výrazně nejnižší hodnotu mají vzorky odebrané ve směru válcování. Tato hodnota je důležitá materiálová vlastnost, na mezi pevnosti byla z tahových diagramů velice dobře pozorovatelná deformace dožatěním.



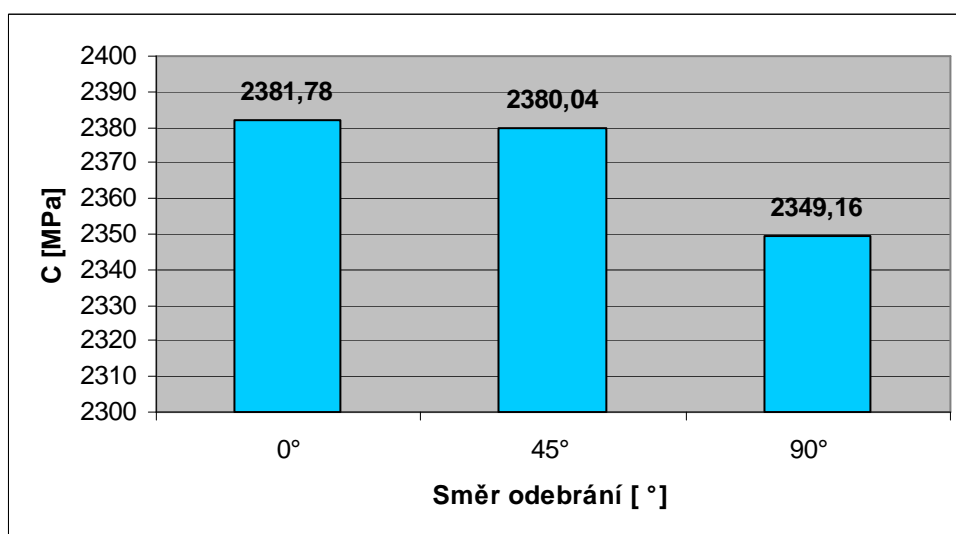
Obr. 8.3.2 Závislost meze kluzu na směru odebraného vzorku

Střední hodnoty mezí kluzu v závislosti na směru odebrání mají podobné rozdíly jako u mezí pevnosti. Nejnižší hodnotu mají vzorky ve směru válcování a následné dva vzorky už nejsou tolik odlišné. Hodnoty meze kluzu a pevnosti nám určí ukazatel hlubokotažnosti a z velké části velikost komplexního ukazatele tažnosti.

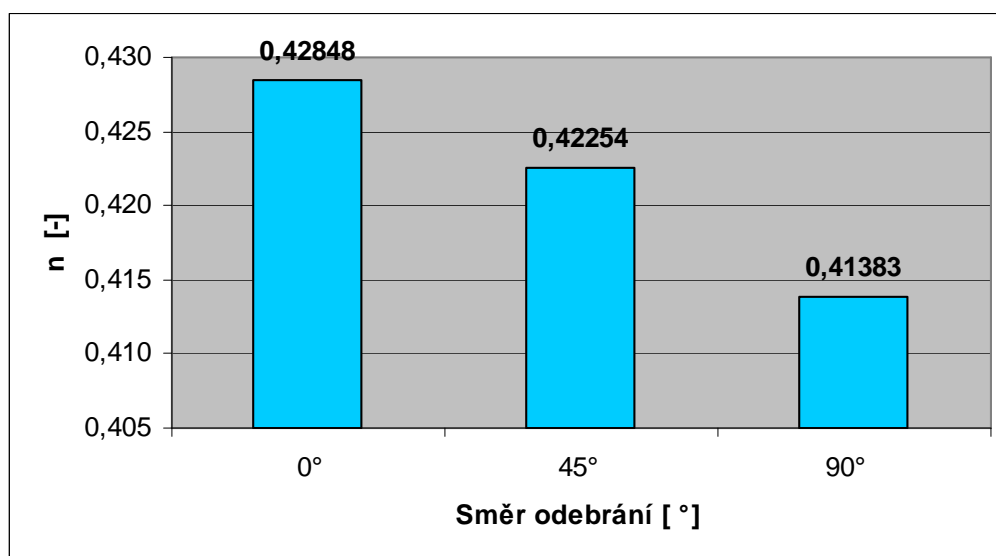


Obr. 8.3.3 Závislost tažnosti na směru odebraného vzorku

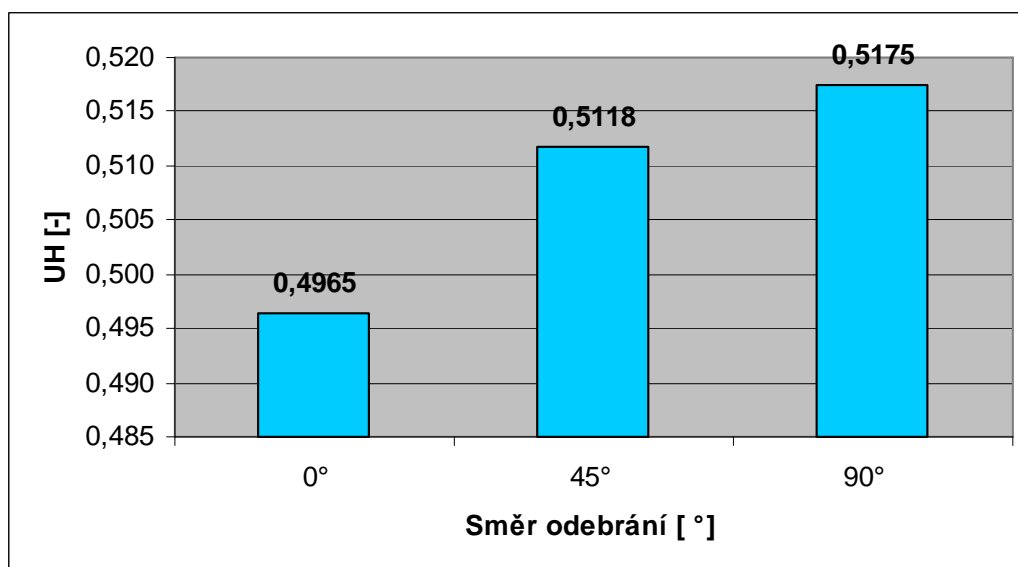
Tažnost je u plechů v automobilovém průmyslu velice důležitá vlastnost. U našich vzorků dosahuje při vysokých mezích pevnosti a kluzu hranice $\approx 60\%$. Nejvyšší střední hodnotu tažnosti mají vzorky odebrané ve směru 45°.



Obr. 8.3.4 Závislost koeficientu zpevnění na směru odebraného vzorku

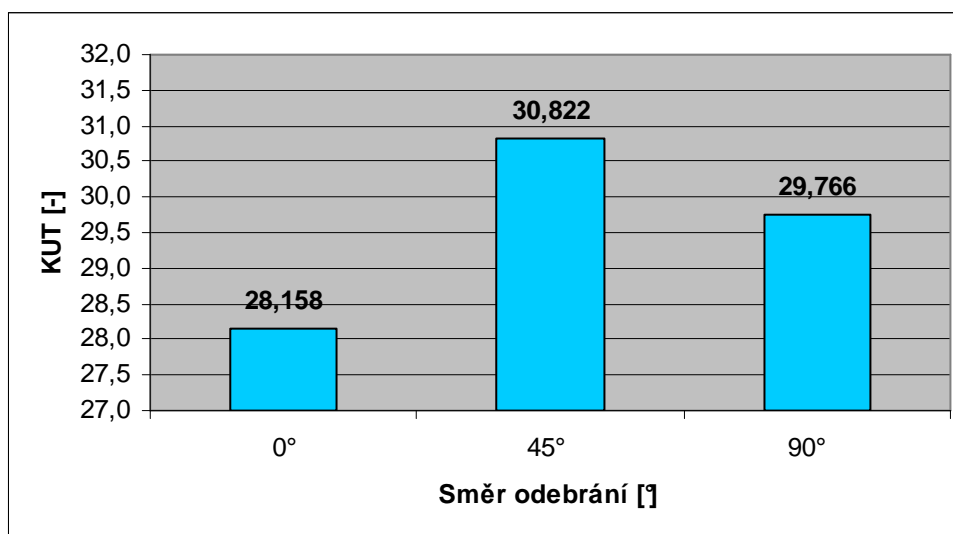


Obr. 8.3.1.5 Závislost exponentu deformačního zpevnění na směru odebraného vzorku



Obr. 8.3.6 Závislost ukazatele hlubokotažnosti na směru odebraného vzorku

Ukazatel hlubokotažnosti je přímo úměrný podílu meze kluzu a meze pevnosti. Takže je úměrná výsledkům těchto mezí (obr.8.3.1 a obr 8.3.2).



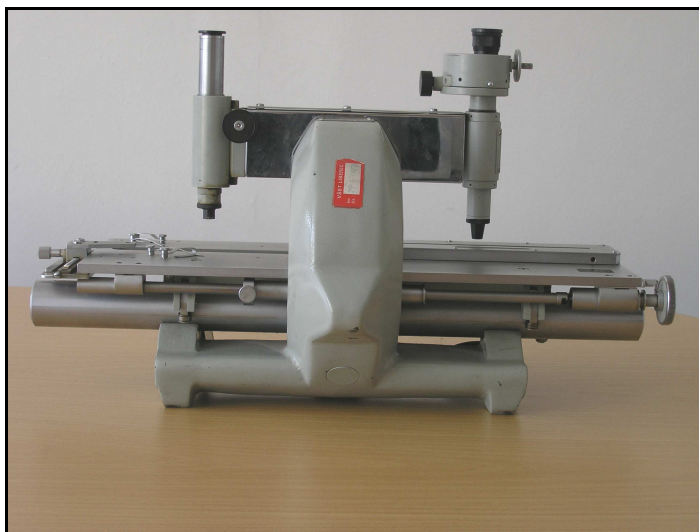
Obr. 8.3.7 Závislost komplexního ukazatele tažnosti na směru odebraného vzorku

Grafické znázornění středních hodnot mechanických vlastností ukazuje minimální rozdíly v měření. Střední hodnoty jsou počítané aritmetickým průměrem ze všech pěti měření v každém směru. Zkoušky ve směru 0° mají nižší mechanické vlastnosti než v ostatních směrech, menší hodnoty ve směru válcování se daly předpokládat. Vzorky ve směru 45° a 90° už vykazují jen malé rozdíly. Celé měření probíhalo s určitou chybou a střední hodnoty jsou počítané se směrodatnou výběrovou odchylkou, tyto dvě hodnoty nám měření ovlivňují, nejsou však nijak zásadní. Rozdíl vlastností v různých směrech nám udává plošná anizotropie, podle malých rozdílů v různých směrech u tahových zkoušek lze předpokládat, že i anizotropie bude v různých směrech podobná.

9. Koeficient anizotropie

Vzorky na anizotropii byly orýsovány, poté deformovány o $\varepsilon = 20\%$ na $L_u = 60$ mm,. Po natažení jsme u vzorků změřili šířku pomocí mikrometru. Naměřili jsme také konečnou délku na Abého délkoměru (obr 9.1.) Koeficienty normálové anizotropie pro jednotlivé směry byly vypočteny v programu Microsoft Excel podle

vzorce (7.1.2). Hodnoty průměrné normálové anizotropie jsou uvedeny v tabulce 9.1.2. Pro každý směr bylo podle výše uvedeného postupu zkoušeno pět vzorků.



Obr. 9.1 Abého délkoměr

Tabulka 9.1.2 Součinitele normálové anizotropie

Směr	0°	45°	90°
Součinitele normálové anizotropie r_a	1,074	1,063	1,087

Výsledky anizotropie potvrdily náš předpoklad, největší anizotropii vykazuje materiál ve směru 90°, poté ve směru 45° a nakonec ve směru 0°. Tyto výsledky ukazují, že materiál je anizotropní.

10. Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na zjišťování základních mechanických vlastností plechů s označením TWIP (Twinning Induced Plasticity). Tento materiál má do budoucna poměrně velké využití a to nejen v automobilovém průmyslu. Pomocí statické zkoušky tahem jsme se zaměřili na určení mechanických vlastností jako mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, koeficient zpevnění, exponent deformačního zpevnění, ukazatele hlubokotažnosti, komplexního ukazatele tažnosti a součinitele normálové anizotropie.

Úvod teoretické části je věnován plastické a elastické deformaci a jejím základním mechanismům. Větší pozornost je věnována deformaci dvojčatěním, které má u tohoto materiálu zásadní vliv, a její průběh je při měření v experimentální části pozorován a popsán.

Další téma popsané v teoretické části je sortiment dnes používaných hlubokotažných plechů v automobilovém průmyslu, popis jejich základních vlastností a druhů včetně popisu teoretických znalostí o materiálu TWIP.

Poslední kapitoly teoretické části jsou zaměřeny na statickou zkoušku tahem, způsob měření, vyhodnocení výše popsaných mechanických vlastností a určení součinitele normálové anizotropie.

Experimentální část zahrnuje výsledky tahových zkoušek a výsledky plošné anizotropie. Zkušební vzorky byly odebrány ze tří směrů, a to ze směru válcování plechové tabule, ze směru 45° na směr válcování a ve směru kolmém na směr válcování. Z každého směru bylo v laboratořích TUL přetrženo 5 vzorků a výsledky zaznamenávány. Tato data byla zpracována a z nich vypočteny mechanické vlastnosti. Stejně počty vzorků ve stejných směrech byly nataženy o 20% a z těchto hodnot se stanovily výsledky normálové a plošné anizotropie.

V bakalářské práci jsou uvedeny výsledky všech patnácti tahových diagramů ze všech tří směrů. Naměřené a vypočtené mechanické vlastnosti jsou zpracovány v přehledných tabulkách. Dále jsou uvedeny tabulky se středními hodnotami mechanických vlastností a grafy porovnávající tyto střední hodnoty v závislosti na směru odebrání vzorků. Závěrečné porovnání všech tří směrů je též uvedeno v experimentální části.

Normálovou anizotropií, postupu jejího měření a stanovení výsledků se věnujeme v poslední kapitole, výsledky všech pěti měření ve všech směrech a střední součinitel normálové anizotropie v každém směru je uveden v tabulce.

Podle tahových diagramů jsme stanovili hodnoty mechanických vlastností. Nejvyšší průměrnou mez pevnosti ($R_m=1154,19$ MPa) mají vzorky ze směru odebrání 90° , nejmenší ve směru 0° ($R_m=1125,56$ MPa). Mez kluzu je opět nejvyšší ve směru odebrání 90° ($R_{p0,2}=597,24$ MPa) a nejnižší ve směru 0° ($R_{p0,2}=558,79$ MPa). Co se týče tažnosti A_{50} nejvyšší hodnoty dosáhli vzorky ve směru 45° ($A_{50}=60,22$ %), což ukazují i výsledky anizotropie. Koeficient zpevnění stejně tak jako exponent deformačního zpevnění měli nejvyšší hodnoty ve směru 0° , poté ve směru 45° a 90° . Ukazatel hlubokotažnosti dosáhl výsledku přímo úměrného poměru $R_{p0,2}/R_m$ (nejvyšší u směru 90° , nejnižší u 0°), respektive komplexní ukazatel tažnosti podle vztahu $(R_{p0,2}/R_m) \cdot A_{50}$ (nejvyšší u směru 45°).

Výsledky měření potvrdili předpoklady z teoretického popisu tohoto materiálu, a sice že, materiál má příznivé mechanické vlastnosti. Vykazuje velice vysokou tažnost ($A_{50} \approx 60\%$), a taky značně vysoké meze pevnosti ($R_m \approx 1150$ MPa) a mez kluz ($R_{p0,2} \approx 590$ MPa), zároveň se jedná o materiál s nízkou hmotností a austenitickou. Jak bylo uvedeno v teoretické části, výborně splňuje požadavky pro karosářský průmysl a je vhodný pro velký rozsah použitých částí jako jsou výztuhy a nosné části karoserií.

Tento materiál zatím spadá stále do oblasti zkoumání, ale jak potvrzují nejen předpoklady, ale i výsledky této práce, jedná se o materiál s poměrně výjimečnými vlastnostmi vhodný na celou řadu strojních součástí. Tento materiál svými vlastnostmi zvláště vyniká v oblasti plošného tváření. A podle faktorů ovlivňujících vývoj a výrobu automobilů má obrovský potenciál zaujmout velice výrazné místo v sortimentu karosářských plechů.

11. Použitá literatura

- [1] Petruželka, J.: Teorie tváření I. 2.vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006.
- [2] Doubek, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších deformačních rychlostech deformace [Disertační práce]. Liberec: Vysokoškolský podnik, 2006
- [3] Ponge, D.: Structural Material – Steels. www.materialsknowledge.org, Summer Schol, Hurtgerwald, 2005.
- [4] Cugy, P. et al.: A Super – Hight strenght Fe – Mn – C Austenitic Steel with Excellent Formability for Automobile Applikation, v Proc. Int. Conf. „Super – high Strength Steels”, AIM + CSM, Rome, 11/2005
- [5] Zrník, J., Kraus, L., Prnka, T., Šterlink, K.: Evropská strategie výrobních procesů. 1.vyd. Praha: Votobia, 2007. ISBN
- [6] PEARCE, P. : Sheet Metal Forming, ISBN 0-7503-0101-5
- [7] HERZTBERG, R.W: Deformation and fracture mechanics of engineering materiále, John Wiley & Sons, 1996, ISBN 0-471-01214-9
- [8] KEJVAL, Z.: Teorie tváření plechů I. – Základy lisování plechu, SNTL Praha, 1964
- [9] MARCINIAK, Z. a kol: Teorie tváření plechů, SNTL, Praha, 1964
- [10] MACHEK, V. – VESELÝ, L. – VESELÝ, M. – VIŠŇÁK, J.: Zpracování tenkých plechů, SNTL Praha, 1983



12. Seznam příloh na CD:

- Tahové diagramy vzorků odebraných ve směru 0°
- Tahové diagramy vzorků odebraných ve směru 45°
- Tahové diagramy vzorků odebraných ve směru 90°

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji – li bakalářskou práci nebo poskytnu – li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with head of the thesis and a consultant.

Date

Signature